DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160916

王静, 王允青, 叶寅, 孟超峰, 王道中, 郭熙盛, 吕国安. 不同农艺措施对巢湖沿岸坡耕地不同形态磷径流输出的控制效果[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 911−919

Wang J, Wang Y Q, Ye Y, Meng C F, Wang D Z, Guo X S, Lü G A. Effect of agronomic measures on phosphorous loss via runoff in sloping croplands around Chaohu Lake[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 911−919

不同农艺措施对巢湖沿岸坡耕地不同形态磷径流输出的控制效果*

王 静[1,2,3], 王允青[1,3], 叶 寅[1,3], 孟超峰[4], 王道中[1,3], 郭熙盛[3**], 吕国安[2**]

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所 合肥 230031; 2. 华中农业大学资源与环境学院 武汉 430070; 3. 安徽省养分循环与资源环境省级实验室 合肥 230031; 4. 安徽省宣城市土壤肥料工作站 宣城 242000)

摘 要: 为明确巢湖沿岸坡耕地不同农艺措施对生态保护和水环境治理的影响, 以农业面源污染长期定位观测基地为平台, 于 2014—2015 年连续 2 a 对常规耕作(CK)、植物篱(黄花菜, PH)、植物篱+秸秆覆盖(PHS)和等高垄作(CR)4 种农艺措施下的水土及随地表径流迁移的各种形态磷进行了监测。结果表明, 与常规耕作相比, PH、PHS 和 CR 能有效地减少径流量和产沙量(P<0.05), 降低效果依次为: PHS>PH>CR。与 CK 相比, PH、PHS 和 CR 可分别减少 23.5%、36.5%和 19.7%的径流流失和 29.5%、45.2%和 26.3%的土壤流失, 表现出显著的水土保持作用。CK 条件下的径流液总磷(TP)浓度是 0.612~1.220 mg·L^{-1}, 其中颗粒态磷(PP)占总磷的 71.5%~81.7%, 颗粒态磷是磷随地表径流迁移的主要形态。在溶解态总磷(DTP)中, 溶解态正磷酸盐(D-Ortho-P)所占比例较大, 为 87.4%~90.7%; 溶解态有机磷(DOP)所占比例较小, 仅占 9.3%~12.6%。与 CK 相比, PHS、PH 和 CR 显著降低了径流液 PP 和 TP 的浓度(P<0.05), 但却不同程度地提高了 DTP 和 D-Ortho-P 的浓度, 而对 DOP 的浓度无显著影响(P>0.05)。CK 条件下, 磷的年流失负荷平均为 0.706 kg·hm^{-2}, 占当年作物施磷量 0.98%。与 CK 处理相比, PH、PHS 和 CR 处理磷的年流失负荷分别降低 38.4%、53.8%和 33.4%(P<0.05), 其对磷素输出的控制效应主要通过减少径流量和降低径流液 PP 的浓度来实现的。综上可知, 植物篱(黄花菜)、植物篱+秸秆还田和等高垄作是控制巢湖沿岸坡耕地水土及磷径流输出的有效措施, 其中植物篱配合秸秆覆盖还田效果最佳。该研究可为巢湖流域坡耕地水土流失和面源污染防治提供科学依据。

关键词: 磷; 径流; 坡耕地; 植物篱; 秸秆覆盖; 等高垄作; 巢湖

中图分类号: S157.4; X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)06-0911-09

Effect of agronomic measures on phosphorous loss via runoff in sloping croplands around Chaohu Lake*

WANG Jing[1,2,3], WANG Yunqing[1,3], YE Yin[1,3], MENG Chaofeng[4], WANG Daozhong[1,3], GUO Xisheng[3**], LYU Guo'an[2**]

(1. Institute of Soil & Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2. College of Resources and

---

* 国家自然科学基金项目(41401308)、国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-007)和安徽省重点实验室绩效评价补助项目(1606c08231)资助

** 通讯作者: 郭熙盛, 主要从事植物营养与施肥研究, E-mail: gxssfiaa@mail.hf.ah.cn; 吕国安, 主要从事水土资源利用研究, E-mail: lvguoanhzau@126.com
王静, 主要从事农业面源污染防控研究。E-mail: wangjinghf1982@163.com

收稿日期: 2016-10-17 接受日期: 2017-02-24

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41401308), the Mega-projects of Science Research for Water Environment Improvement of China (2015ZX07204-007) and the Performance Evaluation Funding for the Key Lab of Anhui Province Technical Program (1606c08231).

** Corresponding authors: GUO Xisheng, E-mail: gxssfiaa@mail.hf.ah.cn; LYU Guo'an, E-mail: lvguoanhzau@126.com

Received Oct. 17, 2016; accepted Feb. 24, 2017

Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Provincial Key Lab for Nutrient Cycling, Resources & Environment of Anhui Province, Hefei 230031, China; 4. Soil and Fertilizer Station of Xuancheng, Xuancheng 242000, China)

Abstract: Eutrophication has been recognized as one of the main global environmental problems in areas with intensive agricultural production where there is nutrient export from farmlands to surface water bodies. Phosphorous (P) via runoff from farmland has been found to be one of the main contributors to water-quality degradation in Chaohu Lake. Thus, source control of P loss from farmlands was critical in remediation of eutrophication in Chaohu Lake. In order to test the efficiency and efficacy of different agronomic measures on reducing runoff, sediment and P loss, a long-term field runoff experiment was carried out in a sloping cropland around Chaohu Lake. Four treatments of agronomic measure were applied — 1) conventional tillage (CK), 2) plant hedgerow of *Hemerocallis citrina* (PH), 3) plant hedgerow with straw mulching (PHS) and 4) contour ridge (CR). Runoff volume, soil loss, concentrations of TP (total phosphorus), PP (particulate phosphorus), DTP (dissolved total phosphorus), D-Ortho-P (dissolved orthophosphate phosphorus) and DOP (dissolved organic phosphorus) as well as P loss via runoff were determined. The results for 2014–2015 showed that PH, PHS and CR treatments significantly reduced soil and water loss in the order as follows: PHS > PH > CR ($P < 0.05$). Also the reduction in sediment was great than that in runoff. Compared with CK, agronomic measures of PH, PHS and CR decreased runoff, respectively, by 23.5%, 36.5% and 19.7%, and reduced sediment, respectively, by 29.5%, 45.2% and 26.3%, showing significant effect on soil and water conservation ($P < 0.05$). The concentration of TP in runoff under CK was 0.612–1.220 $mg \cdot L^{-1}$, in which PP was the predominant form, accounting for 71.5%–81.7% of the TP. In DTP, D-Ortho-P was the main form, accounting for 87.4%–90.7%, while DOP remained in low concentration. It was found that the three agronomic measures (PH, PHS and CR) significantly reduced PP and TP concentrations in runoff ($P < 0.05$), concurrently increased the concentrations of DTP and D-Ortho-P, but had no obvious effect on DOP concentration ($P > 0.05$). Obviously, TP concentrations in the current study were higher than 0.4 $mg \cdot L^{-1}$, exceeding Class V level of the national environmental quality standards for surface water (GB3838—2002). The results implied that P loss via runoff from farmlands in Chaohu Lake region posed pollution risk if allowed to drain directly into the lake. Besides, annual P runoff loss from sloping croplands under CK was 0.706 $kg \cdot hm^{-2}$, the equivalent of 0.98% of applied P fertilizer in the experiment. Compared with CK, PH, PHS and CR reduced annual P loss respectively by 38.4%, 53.8% and 33.4%. Another finding in the study was that the reduction in runoff volume and that in PP concentration were mainly responsible for the decline in P loss. In conclusion therefore, PH, PHS and CR significantly reduced soil, water and P loss via runoff in sloping farmlands in Chaohu Lake region. Among the treatments, PHS was the most effective. The results of this study provided more insight into the need for strategies to reduce agricultural non-point source pollution in Chaohu Lake region and other similar regions.
Keywords: Phosphorous; Runoff; Sloping cropland; Hedgerow of *Hemerocallis citrina*; Straw mulching; Contour ridge; Chaohu Lake

农业面源污染是引起水体环境恶化的主要原因之一[1]，为减少农业面源污染，杨林章等[2]提出了“源头减量-过程阻断-养分再利用-生态修复”的理论和技术体系，其中源头控制是防治农业面源污染的最佳对策和根本。磷(P)不仅是植物生长发育所必需的 3 大营养元素之一，而且也是导致水体富营养化的关键限制性因子[3-5]。许多研究表明，农田土壤磷素的大量输出是引起农业面源污染的主要原因之一。在天然水和废水中，磷以多种形态如正磷酸盐、缩聚磷酸盐、有机磷和颗粒态磷等存在。不同形态的磷对藻类的贡献各不相同：溶解态正磷酸盐(D-Ortho-P)能直接被藻类和细菌吸收利用，其浓度的增加会导致水体富营养化程度的增加[6]；但 D-Ortho-P 仅占总磷(TP)的小部分；颗粒态磷(PP)和溶解态有机磷(DOP)通常情况下不能直接被藻类吸收利用，但它们在总磷中所占的比例可观，并且约有 70%左右可以在胞外酶的作用下降解转化为生物可利用磷[7]。因此，系统研究农田土壤不同形态磷的径流损失特征对于源头控制农业面源污染具有重要意义。巢湖是全国富营养化最为严重的淡水湖泊之一，近年来，政府部门和众多学者投入了大量的治理工程和科技研发，开展了一系列对策措施，取得了较好的成果，然而巢湖水体富营养的趋势仍未得到根本性改观，巢湖西部湖区夏季蓝藻暴发依然普遍，水体富营养化已经成为制约区域经济和社会可持续发展的“瓶颈”因素。目前在该流域关于农田磷素流失的研究多集中在稻麦(油)轮作区[5,8]，而在水土流失较为严重的坡耕地报道则较少，因此这方面的研究亟待进一步补充和深入。

已有研究表明，凡是改变微地形(等高耕作、沟垄种植等)、增加地表覆盖(秸秆覆盖、地膜覆盖等)、改变土壤物理性状(少、免耕等)的耕作措施以及植物篱技术均有减少和防止水土流失发生的作用，并能有效阻控农田养分的流失[9-16]。植物篱技术在保持水

土、控制养分流失、增加经济效益等方面都具有良好的效果。等高垄作有利于改善田间小气候, 可有效提高土壤温度, 拦截径流, 减少土壤和养分流失, 达到集水、保墒、增温的效果。此外, 秸秆还田作为低碳农业、有机农业的重要环节, 对提高土壤有机质含量、培肥地力和减少农田养分流失等具有积极的作用。然而, 植物篱、等高垄作和秸秆还田保持水土和减少农田养分流失的功能和效果受气候条件、地形特征、土壤特征以及植物篱特征等因素的综合影响[12,14-15], 这些农艺措施防控巢湖流域坡耕地磷素流失的效果尚不清楚。鉴于此, 本研究拟以巢湖沿岸农业面源污染长期定位观测基地为平台, 研究小麦(*Triticum aestivum* L.)-芝麻(*Sesamum indicum* L.)模式下, 植物篱[黄花菜(*Hemerocallis citrina* Baroni)]、植物篱+秸秆覆盖和等高垄作 3 种农艺措施在天然降雨条件下对水土和径流不同形态磷输出的控制效果, 以期为巢湖流域农业面源污染防控提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本试验设在安徽省肥东县长临河镇迎霞村(117°27′E, 31°41′N), 距离巢湖水体约 1.5 km。该区域属于江淮低山丘陵区, 位于中新生代的合肥凹陷东部, 地貌以低山丘陵和波状平原为主。研究区属于北亚热带季风气候区, 年均气温 15.5 ℃, 年均降雨量 940~1 000 mm, 且多集中分布在夏季(6—8 月), 无霜期为 224~252 d。该区域主要种植水稻(*Oryza sativa* L.)、冬小麦、玉米(*Zea mays* L.)、芝麻、油菜(*Brassica napus* L.)、棉花(*Anemone vitifolia* Buch.)等。供试土壤为下蜀黄土母质发育的黄棕壤, 试验前 0~20 cm 土壤基本理化性质为: pH 5.95、容重 1.23 $g\cdot cm^{-3}$、有机质 18.22 $g\cdot kg^{-1}$、全氮 1.08 $g\cdot kg^{-1}$、碱解氮 87.12 $mg\cdot kg^{-1}$、全磷 0.35 $g\cdot kg^{-1}$、Olsen-P 9.62 $mg\cdot kg^{-1}$、缓效钾 624.78 $mg\cdot kg^{-1}$、速效钾 156.37 $mg\cdot kg^{-1}$。

1.2　试验设计

试验设 4 个处理: ①常规顺坡耕作(CK); ②植物篱(黄花菜, PH); ③植物篱+秸秆覆盖(PHS); ④等高垄作(CR)。3 次重复, 完全随机区组排列。与试验设计相对应, 本试验共设置 12 个径流小区, 各小区呈北高南低, 坡度 6°, 面积 24 m^2(8 m×3 m), 小区四周设 25 cm 厚的砖砌水泥挡板, 地下部分埋深 30 cm, 地上高 25 cm, 互不渗漏。在每个小区南侧建立径流池, 以便收集降雨产流后的水样和泥沙样, 径流池深地表以下 1 m, 为便于计量径流池内水量, 在池壁上做好刻度线标记。径流池表面铺设石棉瓦防雨设施, 防止雨水灰尘落入, 防止人和动物不慎跌落, 试验区附近设置标准雨量筒, 用以进行降雨观测。

上述处理中, 植物篱(PH)处理选用百合科萱草属植物黄花菜。黄花菜是多年生草本宿根植物, 具有抗干旱、耐贫瘠、耐低温、抗病性强等特点, 其根系发达, 细微根须系统拓展范围可达 50 cm, 保土截流功能较好。此外, 它还具有重要的经济价值, 其花可以食用、入药。黄花菜于 2008 年 6 月移栽, 在小区内定植 3 带, 每带均两行, 行距和株距均为 20 cm, 带间距为 280 cm。植物篱+秸秆覆盖(PHS)处理: 在 PH 处理的基础上, 将上季作物秸秆覆盖于植物篱带间地表, 秸秆剪成 20~30 cm, 用量为 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$。等高垄作(CR)处理: 将小区修建成 6 阶顺坡梯田, 在小区内横向起垄, 垄宽为 1 m, 垄高为 0.14 m, 垄间距 0.4 m。除植物篱带外, 其他处理小区内种植作物, 芝麻-冬小麦轮作, 按照当地的种植方式和种植密度种植。化学肥料用量为: 芝麻季氮肥(N)150 $kg\cdot hm^{-2}$, 磷肥(P_2O_5)90 $kg\cdot hm^{-2}$, 钾肥(K_2O)120 $kg\cdot hm^{-2}$; 小麦季氮肥(N)180 $kg\cdot hm^{-2}$, 磷肥(P_2O_5)75 $kg\cdot hm^{-2}$, 钾肥(K_2O)90 $kg\cdot hm^{-2}$。60%氮肥(尿素)作基肥, 40%氮肥用作追肥(芝麻蕾期追肥, 冬小麦拔节期追肥), 全部磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)作为基肥。

1.3　样品采集与分析

2014—2015 年内每次降雨产流后, 测定径流池水位, 计算径流量。多点采集充分混匀的泥水样于一个干净的桶内混匀, 采集水样 1 L, 最后将径流池清洗干净, 以备下次收集径流。水样取回后一般立即分成两部分, 一部分用于含沙量的测定, 另一部分用于化学指标的测定。取混合水样至少 500 mL, 静置分层 20 h 以上, 过滤、105 ℃烘箱中烘 24 h、冷却后称重, 计算泥沙量[17]。分析的化学指标有总磷(TP)、溶解态总磷(DTP)、溶解态正磷酸盐(D-Ortho-P), 参考《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行测定[18]。TP 采用过硫酸钾氧化-钼酸盐比色法测定; DTP 由水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后, 测定方法与 TP 相同; D-Ortho-P 由水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后, 直接用钼酸盐比色法测定。PP(颗粒态磷)和 DOP(溶解态有机磷)用差减法进行计算, 即 PP=TP−DTP 和 DOP=DTP−D-Ortho-P。

1.4　数据处理

1.4.1　单位面积磷流失负荷(*Q*)计算

场次降雨地表径流各形态磷流失浓度表示一场降雨事件中地表径流全过程排放的各形态磷平均浓度, 其中场次降雨小区内各形态磷平均径流浓度(*C*)

可用式(1)求得:

$$C=\frac{\int_0^t C(t)V(t)dt}{\int_0^t V(t)dt}=\frac{M}{V} \tag{1}$$

式中: C 表示小区内各形态磷径流浓度(mg·L^{-1}), M 为小区内各形态磷排放通量(g), V 为小区内径流通量(L), $C(t)$表示 t 时刻各形态磷径流浓度(mg·L^{-1}), $V(t)$为 t 时刻地表径流量(L), t 为降雨历时。

场次降雨径流事件磷径流流失量可用式(2)求得:

$$Q_i=\sum_{i=1}^{n}C_iV_i/2\,400 \tag{2}$$

式中: Q_i 为第 i 次降雨事件各形态磷流失量, C_i 为径流液各形态磷浓度(mg·L^{-1}), V_i 为 24 m^2 小区的径流量(L)。

各形态磷年径流流失负荷表示全年降雨产生的各形态磷流失负荷总和, 是衡量水土保持和农业面源污染控制效果的重要指标, 可用式(3)求得:

$$Q=\sum_{i=1}^{n}Q_i,\ (i=1,2,3,\cdots,n) \tag{3}$$

式中: Q 为各形态磷累积迁移负荷(kg·hm^{-2}), n 为年降雨产流次数。

1.4.2 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行数据处理与分析, 并用 LSD(least significant difference test)进行样本平均数的差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 不同农艺措施下坡耕地产流产沙效应

2014—2015 年试验期间产生径流的降雨共有 5 次, 分别是在 2014 年的 7 月 4 日和 7 月 24 日, 2015 年的 6 月 16 日、6 月 26 日和 8 月 9 日, 对应的降雨量分别为: 89.5 mm、126.2 mm、96.2 mm、78.9 mm、48.6 mm。本研究以年为单位, 对各个处理的径流量和产沙量分别进行汇总, 结果见图 1。4 个处理的产流量和产沙量从大到小顺序依次为 CK>CR>PH>PHS, 方差分析结果显示, 3 种农艺措施与当地常规顺坡耕作相比差异显著(P<0.05)。与 CK 相比, PH 对地表产流量的降低幅度分别为 20.4%和 26.5%, 平均为 23.5%, 对产沙量的降低幅度分别为 26.0%和 32.9%, 平均为 29.5%。PHS 相比于 CK, 其对产流量的降低幅度分别为 33.0%和 39.9%, 平均为 36.5%, 对产沙量的降低幅度分别为 42.7%和 47.7%, 平均为 45.2%。与 CK 相比, CR 对地表径流量的降低幅度分别为 17.2%和 22.1%, 平均为 19.7%, 对产沙量的降低幅度分别为 22.8%和 29.7%, 平均为 26.3%。由此可见, 这 3 种农艺措施可以有效减少巢湖沿岸坡耕地的产流产沙量, 效果由大到小的顺序为: PHS>PH>CR。比较各处理的减流减沙幅度可以看出, 这 3 种农艺措施的减沙效果大于减流效果。

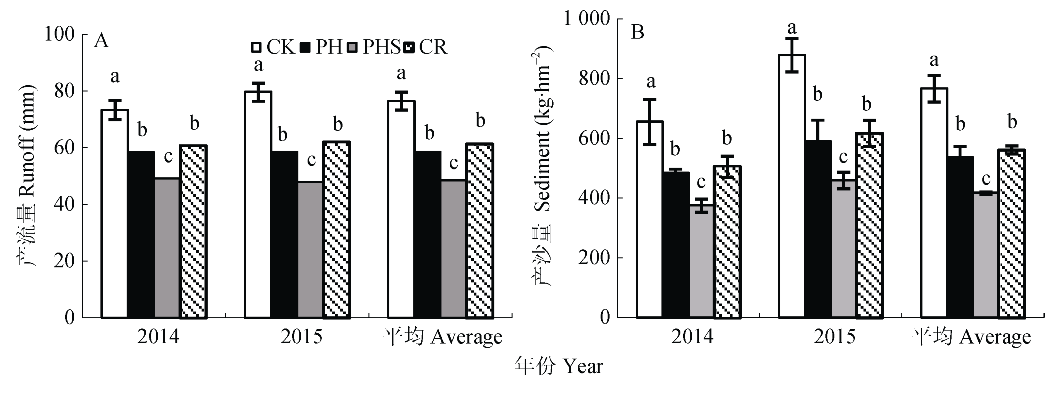


图 1 不同农艺措施下的坡耕地产流量(A)和产沙量(B)

Fig. 1 Runoff (A) and sediment (B) of sloping cropland under different agronomic measures

CK: 常规耕作; PH: 植物篱; PHS: 植物篱+秸秆覆盖; CR: 等高垄作。不同字母表示差异达 5%显著水平。CK: conventional tillage; PH: plant hedgerow; PHS: plant hedgerow with straw mulching; CR: contour ridge. Different letters above the bars mean significant differences at 5% level.

2.2 不同农艺措施对径流液各形态磷浓度的影响

不同农艺措施下历次降雨径流液中 TP、DP、PP、DIP 和 DOP 浓度见表 1。在当地常规顺坡耕作条件下, 径流液 TP 浓度范围为 0.612~1.220 mg·L^{-1}, 均已超过国家地表水环境质量标准(GB3838—2002)中总磷Ⅴ类标准限值 0.4 mg·L^{-1}, 因此巢湖沿岸坡耕地每一次的地表径流都有可能对附近水体的质量产生威胁。与 CK 相比, PHS 显著降低了径流液 TP 和 PP 的浓度(P<0.05), 降幅范围分别为 19.1%~33.5%和 43.4%~54.9%; 然而, 其 DTP 和 DIP 的浓度却显著增加(P<0.05), 增幅范围分别为 33.2%~60.3%和 34.8%~65.8%。与 PHS 相类似, PH 相比于 CK, 其径

流液 TP 和 PP 浓度均显著降低($P<0.05$), 降幅范围分别为 13.6%~24.8%和 26.6%~37.2%, 其 DTP 和 DIP 浓度有不同程度增加, 但差异不显著($P>0.05$)。与 CK 相比, CR 径流液 TP 和 PP 的浓度有不同程度的降低, 降幅范围分别是 13.9%~19.8% 和 22.6%~30.1%。方差分析表明, 径流液 PP 浓度差异显著, TP 浓度在 5 次降雨径流中有 3 次达到显著水平($P<0.05$), DTP 和 D-Ortho-P 的浓度有小幅增加, 但差异不显著($P>0.05$)。不同农艺措施下径流液 DOP 的浓度比较低, 范围是 0.012~0.044 mg·L^{-1}, 各处理间无显著差异。由以上分析可知, PHS、PH 和 CR 这 3 种农艺措施均可以不同程度地降低径流液 TP 和 PP 的浓度, 但却增加了 DTP 和 D-Ortho-P 的浓度, 其中, PHS 对其影响的效应最大。

表 1　历次降雨不同农艺措施下的坡耕地径流液中各形态磷的浓度

Table 1　Concentrations of phosphorous of different forms in surface runoff under agronomic measures

降雨日期(年-月-日) Precipitation date (year-month-day)	农艺措施 Agronomic measure	总磷 Total phosphorus (mg·L^{-1})	颗粒态磷 Particle phosphorus (mg·L^{-1})	溶解态总磷 Dissolved total phosphorus (mg·L^{-1})	溶解态正磷酸盐 Dissolved orthophosphate phosphorus (mg·L^{-1})	溶解态有机磷 Dissolved organic phosphorus (mg·L^{-1})
2014-07-04	CK	1.023±0.107a	0.770±0.066a	0.254±0.042b	0.228±0.039b	0.025±0.003a
	PH	0.809±0.080b	0.504±0.053b	0.305±0.030ab	0.277±0.035ab	0.027±0.009a
	PHS	0.735±0.094b	0.397±0.059c	0.338±0.040a	0.308±0.036a	0.030±0.008a
	CR	0.832±0.082b	0.544±0.048b	0.288±0.034ab	0.261±0.034ab	0.026±0.030a
2014-07-24	CK	0.692±0.084a	0.565±0.058a	0.127±0.027b	0.114±0.028b	0.013±0.001a
	PH	0.521±0.046b	0.355±0.036b	0.166±0.011ab	0.150±0.014ab	0.016±0.003a
	PHS	0.460±0.076b	0.257±0.057c	0.204±0.022a	0.189±0.015a	0.015±0.009a
	CR	0.578±0.071ab	0.437±0.042b	0.141±0.033ab	0.129±0.030b	0.012±0.004a
2015-06-16	CK	1.220±0.120a	0.884±0.082a	0.336±0.041b	0.296±0.039b	0.040±0.002a
	PH	1.014±0.070b	0.608±0.052b	0.406±0.022ab	0.364±0.023ab	0.042±0.002a
	PHS	0.920±0.076b	0.464±0.054c	0.456±0.067a	0.412±0.066a	0.044±0.006a
	CR	1.051±0.124ab	0.669±0.096b	0.381±0.059ab	0.341±0.057ab	0.041±0.002a
2015-06-26	CK	0.825±0.059a	0.588±0.056a	0.224±0.040b	0.195±0.038b	0.028±0.002a
	PH	0.713±0.005b	0.426±0.045b	0.286±0.040ab	0.253±0.042ab	0.033±0.003a
	PHS	0.642±0.046b	0.330±0.019c	0.311±0.027a	0.276±0.034a	0.035±0.007a
	CR	0.662±0.082b	0.411±0.040bc	0.251±0.042ab	0.224±0.040ab	0.027±0.005a
2015-08-09	CK	0.612±0.043a	0.438±0.024a	0.174±0.023b	0.158±0.024b	0.016±0.001a
	PH	0.518±0.073b	0.321±0.033b	0.196±0.041ab	0.180±0.034ab	0.016±0.006a
	PHS	0.495±0.037b	0.248±0.042c	0.247±0.025a	0.231±0.028a	0.016±0.003a
	CR	0.513±0.032b	0.330±0.045b	0.183±0.034ab	0.169±0.029ab	0.014±0.006a

CK: 常规耕作; PH: 植物篱; PHS: 植物篱+秸秆覆盖; CR: 等高垄作。同列同一降雨日期不同字母表示差异达 5%显著水平。CK: conventional tillage; PH: plant hedgerow; PHS: plant hedgerow with straw mulching; CR: contour ridge. Values followed by different letters in a column for the same precipitation date are significantly different at 5% level.

2.3　不同农艺措施对径流液磷素形态的影响

径流液中各形态磷所占比例见表 2。在当地常规耕作条件下, 颗粒态磷占总磷(PP/TP)的比例为 71.3%~81.7%, 这表明径流搬运的颗粒物(粒径≥0.45 μm)是坡耕地地表径流磷迁移的主要载体, 与之相结合的磷是地表径流磷素迁移的主要形态, 这与前人的研究结果一致[19-20]。在 DTP 中, D-Ortho-P 所占比例较大, 其值为 87.4%~90.7%, DOP 所占比例较小, 仅占 9.3%~12.6%。研究还发现, 与 CK 相比, 3 种农艺措施不仅有效降低了 PP 的浓度($P<0.05$), 还显著降低了其所占 TP 的比例($P<0.05$), 特别是 PHS 处理, PP/TP 的值降至 50.1%~55.8%。

2.4　不同农艺措施对磷素径流损失的阻控效果

由于降雨条件及农业管理措施等因素的综合影响, 场次降雨径流中磷流失负荷波动较大, 所以降雨径流磷年流失负荷(即排放通量)更具有代表性, 实际应用中也常用磷年流失负荷表征某一流域降雨径流中磷流失状况。本研究以年为单位, 对各个处理的不同形态磷的年流失负荷进行了汇总, 结果见表 3。CK 常规耕作条件下, TP 年流失负荷平均为 0.706 kg·hm^{-2}, 占当年作物施磷量 0.98%, 超过了以往研究[21]提出的环境可接受的磷素流失量 0.44 kg·hm^{-2}·a^{-1}, 这也进一步说明了巢湖沿岸坡

表 2 历次降雨径流液中各形态磷的比例

Table 2 Ratios of different phosphorus forms in surface runoff under different agronomic measures in different precipitation events %

农艺措施 Agronomic measure	2014-07-04			2014-07-24			2015-06-16			2015-06-26			2015-08-09		
	PP/TP	D-Ortho-P/DTP	DOP/DTP	PP/TP	D-Ortho-P/DTP	DOP/DTP	PP/TP	D-Ortho-P/DTP	DOP/DTP	PP/TP	D-Ortho-P/DTP	DOP/DTP	PP/TP	D-Ortho-P/DTP	DOP/DTP
CK	75.2	90.1	9.9	81.7	89.7	10.3	72.5	88.1	11.9	71.3	87.4	12.6	71.5	90.7	9.3
PH	62.4	91.1	8.9	68.1	90.6	9.4	59.9	89.7	10.3	59.8	88.4	11.6	62.1	91.8	8.2
PHS	54.1	91.2	8.8	55.8	92.8	7.2	50.4	90.3	9.7	51.5	88.7	11.3	50.1	93.4	6.6
CR	65.4	90.8	9.2	75.6	91.5	10.9	63.7	89.4	10.6	62.1	89.2	10.8	64.3	92.3	7.7

CK: 常规耕作; PH: 植物篱; PHS: 植物篱+秸秆覆盖; CR: 等高垄作。PP/TP、D-Ortho-P/DTP 和 DOP/DTP 分别表示颗粒态磷占总磷的比例、溶解态正磷酸盐占溶解态总磷的比例和溶解态有机磷占溶解态总磷的比例。CK: conventional tillage; PH: plant hedgerow; PHS: plant hedgerow with straw mulching; CR: contour ridge. PP/TP indicates the percentage of particle phosphorous to total phosphorous; D-Ortho-P/DTP indicates the percentage of dissolved orthophosphate phosphorus to dissolved total phosphorus; DOP/DTP indicates the percentage of dissolved organic phosphorus to dissolved total phosphorus.

表 3 不同农艺措施下各形态磷年流失负荷

Table 3 Annual losses of different forms of phosphorus via runoff under different agronomic measures

年份 Year	农艺措施 Agronomic measure	总磷 Total phosphorous		颗粒态磷 Particle phosphorous		溶解态总磷 Dissolved total phosphorus		溶解态正磷酸盐 Dissolved orthophosphate phosphorus		溶解态有机磷 Dissolved organic phosphorus	
		流失量 Loss (kg·hm^{-2})	减幅 Decrease (%)	流失量 Loss (kg·hm^{-2})	减幅 Decrease (%)	流失量 Loss (kg·hm^{-2})	减幅 Decrease (%)	流失量 Loss (kg·hm^{-2})	减幅 Decrease (%)	流失量 Loss (kg·hm^{-2})	减幅 Decrease (%)
2014	CK	0.613±0.087a	—	0.480±0.059a	—	0.133±0.028a	—	0.120±0.027a	—	0.013±0.002a	—
	PH	0.373±0.052bc	39.1	0.243±0.036b	49.3	0.130±0.016a	2.5	0.118±0.018a	1.4	0.012±0.002a	12.4
	PHS	0.283±0.056c	53.9	0.155±0.036c	67.6	0.127±0.021a	4.5	0.117±0.018a	2.3	0.010±0.004a	24.2
	CR	0.415±0.056b	32.2	0.293±0.036b	38.9	0.122±0.021a	8.2	0.111±0.020a	7.0	0.011±0.002a	19.0
2015	CK	0.800±0.078a	—	0.583±0.039a	—	0.220±0.034a	—	0.195±0.033a	—	0.026±0.002a	—
	PH	0.497±0.036b	37.9	0.298±0.022b	48.8	0.198±0.016a	10.0	0.177±0.014a	8.8	0.021±0.002b	19.7
	PHS	0.370±0.046c	53.8	0.188±0.030c	67.7	0.181±0.021a	17.7	0.164±0.019a	15.9	0.018±0.002b	30.9
	CR	0.526±0.088b	34.2	0.334±0.059b	42.7	0.192±0.034a	12.8	0.172±0.032a	11.4	0.020±0.002b	23.1
平均 Average	CK	0.706±0.082a	—	0.529±0.048a	—	0.177±0.031a	—	0.157±0.030a	—	0.020±0.002a	—
	PH	0.435±0.039bc	38.4	0.271±0.025b	49.0	0.164±0.014a	7.2	0.148±0.015a	5.9	0.016±0.001ab	17.2
	PHS	0.326±0.050c	53.8	0.172±0.033c	67.6	0.154±0.020a	12.7	0.140±0.017a	10.8	0.014±0.003a	28.6
	CR	0.471±0.071b	33.4	0.313±0.047b	41.0	0.157±0.024a	11.0	0.142±0.023a	9.7	0.015±0.002b	21.7

CK: 常规耕作; PH: 植物篱; PHS: 植物篱+秸秆覆盖; CR: 等高垄作。不同字母表示差异达 5%显著水平。CK: conventional tillage; PH: plant hedgerow; PHS: plant hedgerow with straw mulching; CR: contour ridge. Different letters above the bars mean significant differences at 5% level.

耕地磷素随地表径流的迁移有可能对附近水体的质量产生威胁。PP、DTP、D-Ortho-P 和 DOP 的平均年流失负荷分别占 TP 的 75.0%、25.0%、22.3%和 2.8%。从表 3 可看出，不同农艺措施对巢湖沿岸坡耕地 TP、PP 年流失负荷影响显著，显著降低了 TP 和 PP 随地表径流的迁移量($P<0.05$)。与 CK 相比，PH、PHS 和 CR 的 TP 年流失负荷平均分别降低 38.4%、53.8%和 33.4%($P<0.05$), PP 的降低幅度则分别为 49.0%、67.6%和 41.0%($P<0.05$)，同时，也不同程度降低了 DTP、D-Ortho-P 和 DOP 的年流失负荷。由此可见，植物篱、植物篱+秸秆覆盖和等高垄作可以有效控制巢湖沿岸坡耕地随地表径流迁移磷素，其中，植物篱+秸秆覆盖的效果最好。

3 讨论

3.1 不同农艺措施对磷径流损失的阻控作用

不同农艺措施下，径流液各形态磷浓度是否比常规耕作条件下有所降低，已有文献的研究结论不尽一致。Wang 等[22]研究表明，紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)间作玉米和黄花间作玉米模式下径流液总磷及生物可利用磷浓度较常规玉米种植模式高，颗粒态磷则相反；张洋等[20]研究则表明，三带等高桑(*Morus alba* L.)+交叉耕作方式能够显著降低径流液 TP、PP 和 DTP 的浓度。本研究结果表明，植物篱、植物篱+秸秆覆盖和等高垄作 3 种农艺措施显著降低了径流液 PP 和 TP 的浓度，与此同时却不同程度提高了 DTP 和 D-Ortho-P 的浓度。分析其原因，土

壤磷素的流失过程实质上是表层土壤与降雨和径流相互作用的过程, 径流液磷素的浓度主要取决于径流对土壤表层磷的稀释作用和径流在坡面传递过程中与磷素的相互作用。在本试验条件下, 3 种农艺措施增加径流液 TDP 和 D-Ortho-P 浓度的原因在于其对径流流速的减缓作用, 加剧了径流与表层土壤的相互作用, 使得溶解和解吸于单位径流中的 TDP 和 D-Ortho-P 的含量有所增加。另外, 长期秸秆还田(包括还田的秸秆和刈割的植物篱地上部分)增加了土壤磷储量, 提高了土壤的供磷能力[23], 再加上秸秆腐解分泌的有机酸可能提高了土壤磷的活性, 促进了磷在土壤中的迁移[24]。而径流 PP 的含量主要受降雨溅蚀与径流侵蚀作用的影响, 这 3 种农艺措施具有明显的减流减沙作用, 削弱了降雨-径流过程对表层土壤 PP 的侵蚀, 相应也减少了单位径流中随泥沙迁移的 PP 含量。

本研究结果显示, 与常规耕作相比, 植物篱、植物篱+秸秆覆盖和等高垄作 3 种农艺措施均显著降低了径流液 TP 流失负荷, 表明 3 种农艺措施可以有效地控制坡耕地磷素随地表径流的迁移, 这与相关文献的报道基本一致[13-16,25]。如: 三峡库区湖北秭归县段 20º紫色坡耕地香根草(*Vetiveria zizanioides* L.)植物篱+小麦-玉米轮作模式年均 TP 流失负荷为 20.51 mg·m^{-2}, 仅为对照的 56.95%[16]; 湖北丹江口流域黄花菜植物篱径流磷比对照减少 78.3%[25]; 辽宁省棕壤坡耕地采取垄作模式, 其径流磷流失量比对照减少 34.9%, 泥沙携带磷减少 12.1%[14]; 巢湖流域水旱轮作田旱作时采取秸秆覆盖还田措施, 其 TP 流失负荷比对照减少 32.3%[13]。土壤磷素地表径流流失负荷是由径流量和 TP 浓度共同决定的, 其中 TP 的浓度又由 DTP 和 PP 的浓度共同决定。本研究中, 尽管 3 种农艺措施均不同程度地提高了 DTP 的浓度, 但由于 PP 是坡面磷素随径流迁移的主要形态, 3 种农艺措施对其减少的程度远大于对 DTP 的影响, 从而降低了 TP 的浓度。综合径流量、泥沙量和径流液各形态磷浓度来看, 其对磷素输出的控制效应主要通过减少径流量和降低径流液 PP 的浓度来实现。

3.2　巢湖流域坡耕地磷素径流流失水平

坡面磷素的流失受到诸如土壤性质、气候条件、植被覆盖、农业管理措施、地形地貌等因素的综合影响。Liu 等[26]对丹江库区坡耕地柑橘(*Citrus reticulata* Blanco.)园不同覆盖方式下地表径流氮磷流失进行研究, 结果表明, 该地区柑橘园坡耕地在当地常规管理模式下的磷素地表径流年流失负荷为 1.6~1.7 kg·hm^{-2}; 林超文等[27]对四川紫色丘陵区坡耕地不同耕作和覆盖方式下玉米生育期中水土及养分流失的研究则表明, 该地区坡耕地在常规顺坡垄作条件下磷素的当季径流损失量平均为 27.18 kg·hm^{-2}; 张洋等[20]对三峡库区旱坡地氮磷流失的研究表明, 该地区玉米-榨菜(*Brassica juncea* L.)轮作模式下磷素年流失通量为 0.23 kg·hm^{-2}; 鲁耀等[28]对云南坡耕地地表径流氮磷流失特征定位监测表明, 该地区常规施肥顺坡耕作磷素年流失负荷为 1.45~6.78 kg·hm^{-2}。本研究结果表明, 巢湖流域坡耕地当地常规顺坡耕作磷素年流失负荷平均为 0.706 kg·hm^{-2}。可见, 不同地区坡耕地磷素径流流失水平差异比较大。与其他地区相比较, 巢湖流域坡耕地磷素径流流失水平处于中等水平。储茵等[29-30]对巢湖沿岸圩区夏季水稻生长期和冬季油菜-麦季磷的输出特征进行研究, 结果表明, 巢湖沿岸圩区稻油轮作区和稻麦轮作区磷素年输出负荷分别为 0.27 kg·hm^{-2}和 0.48 kg·hm^{-2}。可见, 巢湖沿岸坡耕地磷素的流失水平要高于同地区的稻麦(油)轮作区, 其对巢湖水体的潜在和长期影响同样不容忽视。另外, 降雨的随机性决定了不同年份的农田磷素流失量差异比较大, 要更加准确地评估巢湖流域坡耕地土壤磷素地表径流流失负荷尚需长期的监测研究。

4　结论

植物篱(PH)、植物篱+秸秆覆盖(PHS)和等高垄作(CR)3种农艺措施可以有效控制巢湖流域坡耕地水土流失的风险, 效果依次为: PHS>PH>CR。颗粒态磷是巢湖流域坡耕地磷素随地表径流迁移的主要形态; 在溶解态总磷中, 溶解态正磷酸盐所占比例较大, 溶解态有机磷所占比例较小; PH、PHS和CR显著降低了径流液颗粒态磷和总磷的浓度, 与此同时却不同程度地提高了溶解态总磷和溶解态正磷酸盐的浓度, 而对溶解态有机磷的浓度无显著影响。植物篱、植物篱+秸秆覆盖和等高垄作3种农艺措施可以有效减少坡耕地磷素流失负荷, 径流量的减少和颗粒态磷浓度的降低是3种农艺措施有效控制磷输出的主要机制, 其中植物篱+秸秆覆盖的效果最好, 可以作为源头控制巢湖沿岸坡耕地农业面源污染物磷输出的有效措施。

本试验磷流失及其负荷的计算主要关注地表径流中磷形态的损失, 而未考虑磷的淋溶损失, 需要在后续工作中进一步完善。

参考文献　References

[1] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. Ⅰ. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估

计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008–1017
Zhang W L, Wu S X, Ji H J, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies Ⅰ. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1008–1017

[2] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的"4R"理论与工程实践——总体思路与"4R"治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1–8
Yang L Z, Shi W M, Xue L H, et al. Reduce-retain- reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(1): 1–8

[3] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 130–144

[4] Sharpley A N. Soil mixing to decrease surface stratification of phosphorus in manured soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(4): 1375–1384

[5] Wang J, Lü G A, Guo X S, et al. Conservation tillage and optimized fertilization reduce winter runoff losses of nitrogen and phosphorus from farmland in the Chaohu Lake region, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101(1): 93–106

[6] Zieliński P, Jekatierynczuk-Rudczyk E. Comparison of mineral and organic phosphorus forms in regulated and restored section of a small lowland river (NE Poland)[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2015, 15(3): 125–135

[7] Qin C, Liu H Z, Liu L, et al. Bioavailability and characterization of dissolved organic nitrogen and dissolved organic phosphorus in wastewater effluents[J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 47–53

[8] 汪丽婷, 马友华, 储茵, 等. 巢湖流域不同施肥措施下稻田氮磷流失特征与产量研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 40–43
Wang L T, Ma Y H, Chu Y, et al. Study of nitrogen and phosphorus losses and yield of rice in different fertilizations of Chaohu Lake Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 40–43

[9] Stevens C J, Quinton J N, Bailey A P, et al. The effects of minimal tillage, contour cultivation and in-field vegetative barriers on soil erosion and phosphorus loss[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 145–151

[10] 肖继兵, 孙占祥, 蒋春光, 等. 辽西地区坡耕地垄膜沟种对土壤侵蚀和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3904–3917
Xiao J B, Sun Z X, Jiang C G, et al. Effect of technique of ridge film mulching and furrow seeding on soil erosion and crop yield on sloping farmland in western Liaoning[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(20): 3904–3917

[11] Lal R. Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol: Ⅱ. Water runoff, soil erosion, and nutrient loss[J]. Agroforestry Systems, 1989, 8(2): 97–111

[12] 蔡强国, 黎四龙. 植物篱笆减少侵蚀的原因分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 54–60
Cai Q G, Li S L. Effect of contour hedgerows on control of soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 4(2): 54–60

[13] 王静, 郭熙盛, 王允青. 自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 492–495
Wang J, Guo X S, Wang Y Q. Effect of straw mulch on nitrogen and phosphorus loss from farmlands in Chaohu Lake region under natural rainfall condition[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 492–495

[14] 辛燕, 王瑄, 邱野, 等. 辽宁省不同耕作方式对坡耕地水土及氮磷养分流失的影响效果[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 27–30
Xin Y, Wang X, Qiu Y, et al. Effects of different tillage modes on soil, water and N, P nutrient loss on sloping croplands in Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 27–30

[15] Xiao B, Wang Q H, Wang H F, et al. The effects of grass hedges and micro-basins on reducing soil and water loss in temperate regions: A case study of Northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 122: 22–35

[16] 夏立忠, 马力, 杨林章, 等. 植物篱和浅垄作对三峡库区坡耕地氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 104–111
Xia L Z, Ma L, Yang L Z, et al. Effects of hedgerows and ridge cultivation on losses of nitrogen and phosphorus of slope land in Three Gorges Reservoir area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 104–111

[17] 郭索彦. 水土保持监测理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 202–205
Guo S Y. Theory and Method of Soil and Water Conservation Monitoring[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 202–205

[18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243–250
State Environmental Protection Administration of China (SEPA). Water and Wastewater Monitoring Analysis Method[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243–250

[19] 周明华, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1374–1381
Zhou M H, Zhu B, Wang T, et al. Phosphorus losses and effects of fertilization on sloping cropland of purple soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1374–1381

[20] 张洋, 樊芳玲, 周川, 等. 三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 189–201
Zhang Y, Fan F L, Zhou C, et al. Effects of crop/mulberry intercropping on surface nitrogen and phosphorus losses in Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 189–201

[21] Van der Molen D T, Breeuwsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives[J]. Journal of Environmental

Quality, 1998, 27(1): 4–11
[22] Wang T, Zhu B, Xia L Z. Effects of contour hedgerow intercropping on nutrient losses from the sloping farmland in the three gorges area, China[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(1): 105–114
[23] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1741–1749
Wu J, Guo X S, Lu J W, et al. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(9): 1741–1749
[24] 彭娜, 王凯荣, Buresh R J, 等. 不同水分条件下施用稻草对土壤有机酸和有效磷的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 347–351
Peng N, Wang K R, Buresh R J, et al. Effect of rice straw incorporation on concentration of organic acids and available phosphorus in soil under different water regimes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(2): 347–351
[25] 姚桂枝, 刘章勇. 丹江口库区坡耕地不同植物篱对径流及养分流失的影响初探[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3015–3016
Yao G Z, Liu Z Y. Preliminary study on the effects of different hedgerow on the runoff and nutrient loss on slope farmland in Danjiangkou reservoir[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(6): 3015–3016
[26] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110: 34–40
[27] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6091–6101
Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, et al. Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6091–6101
[28] 鲁耀, 胡万里, 雷宝坤, 等. 云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1544–1553
Lu Y, Hu W L, Lei B K, et al. The monitoring of nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in sloping red soil fields of Yunnan Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(8): 1544–1553
[29] 储茵, 汪丽婷, 马友华, 等. 巢湖沿岸典型圩区夏季水稻生长期营养盐输出特征研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 135–140
Chu Y, Wang L T, Ma Y H, et al. Nutrient export from a typical polder area around Chao Lake during rice growing period in the summer[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 135–140
[30] 储茵, 汪丽婷, 马友华, 等. 巢湖沿岸典型圩区油菜-小麦生长季营养盐输出特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 36–41
Chu Y, Wang L T, Ma Y H, et al. Nutrient export from a typical polder area around Lake Chao during rape and wheat growing period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 36–41